

# Optimierte Auslegung von induktiven Bauelementen für EMV - Filter in mobilen Anwendungen

Tobias Kut<sup>1</sup>, Arno Lücken<sup>2</sup>, Stefan Dickmann<sup>1</sup>, Detlef Schulz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grundlagen der Elektrotechnik, <sup>2</sup>Elektrische Energiesysteme  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

## 1 Abstract

Für die Automobil- und Luftfahrttechnik ist die Volumen- und Gewichtsminimierung von induktiven Bauelementen bei leistungselektronischen Systemen von großer Bedeutung. Bei der Auslegung sind diese Komponenten, insbesondere die Gleichtakt- und Speicherdrossel, jeweils Schlüsselbauteile. In diesem Beitrag werden daher verschiedene Kernmaterialien hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Eigenschaften, wie Frequenzverhalten, Sättigungsflussdichte und Leistungsgewicht in Theorie und Praxis diskutiert. Basierend auf diesen Ergebnissen werden unterschiedliche DC/DC - Wandler sowie Filtertopologien aufgebaut, vermessen und hinsichtlich ihrer Gewichtseinsparungen gegenübergestellt.

## 2 Einführung

Die zunehmenden Störungen, z.B. infolge der Elektromobilität im Automobilsektor [1] oder der Umsetzung des „More - Electric - Aircraft“ - Konzepts in der Luftfahrt [2], müssen unter Zuhilfenahme von EMV - Filtern unter normativ festgelegte Grenzwerte bedämpft werden. Entscheidend ist hierbei die optimale Auslegung der induktiven Filterelemente, insbesondere der Gleichtakt-drossel für die EMV. Heutige Lösungen sind oftmals überdimensioniert, weil sie im Entwicklungsprozess erst sehr spät Berücksichtigung finden und somit nicht bestmöglich auf das jeweilige System ausgelegt werden können [3, 4].



Bild 1: Übersicht verschiedener Kernmaterialien zur Verwendung als Speicherdrossel sowie als EMV - Filterelement.

In Hinblick auf mobile Anwendungen sind hierzu in den letzten Jahren verschiedene neue Kernmaterialien am Markt verfügbar geworden (Bild 1). Für leistungselektronische Systeme im Bereich von 10 kW elektrischer Leistung und einer Störunterdrückung im leitungsgeführten Frequenzbereich von 9 kHz – 30 MHz lassen sich hier zum Teil deutliche Gewichtsvorteile durch den Einsatz dieser – bei gleicher Leistungsfähigkeit – erzielen. Hierbei ist deutlich der Trend hin zu kleineren und leichteren Materialien sichtbar. Durch

die stetig steigenden Taktfrequenzen (100 kHz – 300 kHz) der eingesetzten Halbleiter können diese Betrachtungen ebenso für die notwendigen Speicherdrosseln von Gleichspannungswandlern angewendet werden.

### 3 Allgemeiner Materialüberblick

Grundsätzlich können für die hier beschriebene Anwendung drei Hauptgruppen von Kernen klassifiziert werden. Die Gruppe der Mangan-Zink-Ferrite sowie Nickel-Kupfer-Zink-Verbindungen sind die in der Vergangenheit häufig eingesetzten Materialien. Diese werden aufgrund ihrer relativ geringen Leistungsdichte zumindest in dieser Leistungsklasse für mobile Applikationen immer weniger verwendet. Die beiden anderen Gruppen (Eisenpulverkerne und amorphe/nanokristalline Strukturen) zeichnen sich dadurch aus, dass sie den für Speicherdrosseln nötigen Luftspalt als verteilten Luftspalt aufgrund der Materialstruktur bereitstellen. Dies erklärt auch die im Gegensatz zu den Ferriten erhöhte Sättigungsflussdichte von bis zu 2 T im Vergleich zu 0,5 T. Des Weiteren sind Unterschiede in der zu verwendenden Frequenz sowie der effektiven Permeabilität sichtbar. In Bild 2 ist hierzu die Permeabilität über der Frequenz und in Bild 3 über der Sättigungsflussdichte für verschiedene Materialien dargestellt [5]. Die höchste Permeabilität findet sich

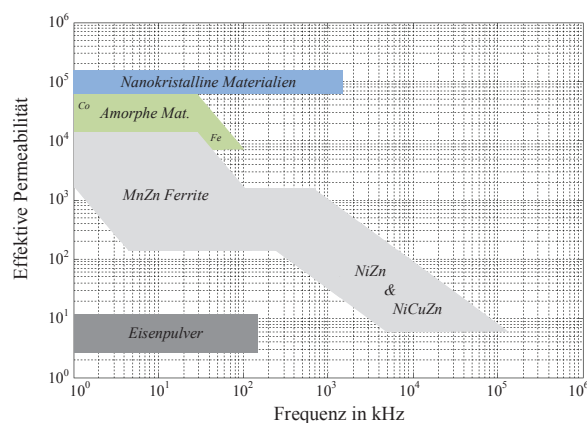


Bild 2: Effektive Permeabilität über der Frequenz.

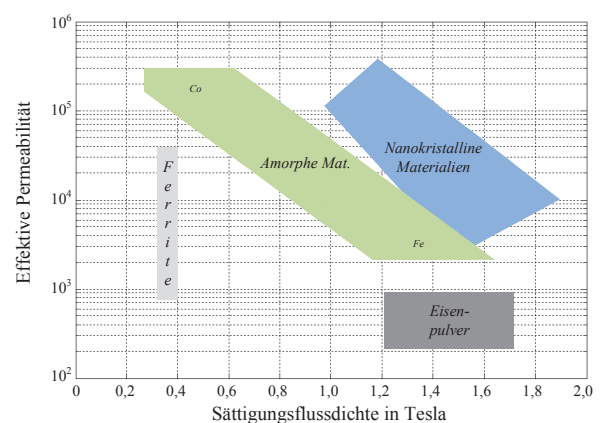


Bild 3: Effektive Permeabilität über der Sättigungsflussdichte.

für amorphe bzw. nanokristalline Kerne. Jedoch sind diese zwar für hohe Sättigungsflussdichten zugelassen, haben aber einen relativ geringen Einsatzbereich in der Frequenz. Für EMV - Filter sind diese nach heutigem Stand der Technik bis zu einigen MHz einsetzbar - siehe Kapitel 5. Für Speicherdrosseln sind die hohen Sättigungsflussdichten vorteilhaft. Die beiden anderen Kernvarianten definieren die jeweiligen Grenzen in den dargestellten Bildern. Eisenpulverkerne zeichnen sich durch eine hohe Sättigungsflussdichte aus, haben aber relativ geringe Permeabilitätswerte, sodass zum Erreichen der Induktivität mehr Windungen auf den Kern gewickelt werden müssen. Im Vergleich dazu die Ferrite, die über einen breiten Frequenzbereich eingesetzt werden können, aber geringe Werte in der Sättigungsflussdichte aufweisen und somit gerade in Hinblick auf hohe Ströme von einigen zehn Ampere in die Sättigung geraten können. Zukünftig werden die Bereiche der amorphen und nanokristallinen Kernmaterialien aufgrund ihrer Legierungsstruktur weiter stark ansteigen und bilden das Material der Wahl bei zukünftigen Speicherdrosseln sowie EMV - Filtern. Wünschenswert sind hier hohe Impedanzen über einen breiten Frequenzbereich sowie hohe Werte für die Sättigungsflussdichte. Hinsicht-

lich der Gewichts- und Volumenminimierung sind hierzu Einsparungen im Bereich von 20 % – 70 % möglich.

#### 4 Theorie

Neben dem Trend hin zu leichteren Kernmaterialien beim Design von Speicherdrosseln und EMV - Filterkomponenten werden auch die Schaltfrequenzen der Halbleiter von leistungselektronischen Systemen erhöht. Dadurch können die Induktivitäten im Wert verringert werden und sparen somit Gewicht ein. Beispielhaft ist diese Abhängigkeit von der Frequenz in Bild 4 nach (1) für einen Gleichspannungswandler mit einer Eingangsspannung von  $U_{\text{Ein}} = 80 \text{ V}$ , einer Ausgangsspannung von  $U_{\text{Aus}} = 270 \text{ V}$  und einer maximalen Stromwelligkeit von  $\Delta I_{\text{pp}} = 5 \text{ A}$  gezeigt [6].

$$L = \frac{U_{\text{Ein}} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{Ein}}}{U_{\text{Aus}}}\right)}{f \cdot \Delta I_{\text{pp}}} \quad (1)$$

Mit der Nutzung neuer Materialien lässt sich diese Gewichtsminimierung noch weiter un-

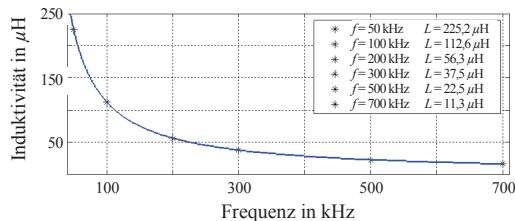


Bild 4: Induktivitätskennlinie über der Frequenz für einen Gleichspannungswandler.

terstützen. Wie eingangs erwähnt, ist es jedoch wichtig, dass bei der Auslegung die maximal zulässige Sättigungsflussdichte nicht überschritten wird. Ziel dieses Absatzes ist es, ein Vorgehen zu beschreiben, welche Größen bei der Auslegung unterschiedlicher Kerne berücksichtigt werden sollten. Ausgehend von der allgemein bekannten Hysteresekurve

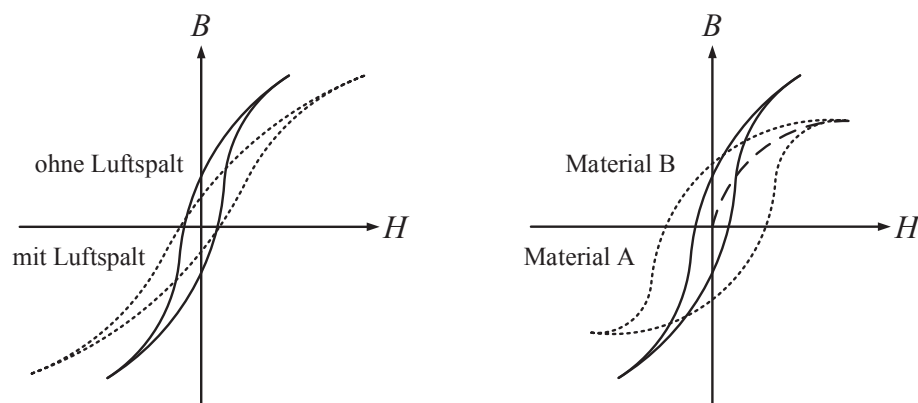


Bild 5: Vergleich von Hysteresekurven mit und ohne Luftspalt (links) sowie für verschiedene Materialien (rechts).

(Bild 5 (links) mit/ohne Luftspalt und Bild 5 (rechts) für unterschiedliche Kernmaterialien) gelten nachfolgende Definitionen: initiale oder relative Permeabilität  $\lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}$

als Verhältnis der Flussdichteänderung  $\Delta B$  zur Feldstärkeänderung  $\Delta H$  bei sehr kleinen Wechselfeldern (Neukurve) mit der Magnetfeldkonstanten als Proportionalitätsfaktor  $\mu_0$  [7]. Diese dient als Hauptunterscheidungsmerkmal bei unterschiedlichen Materialien und gilt für geschlossene magnetische Kurven. Des Weiteren die effektive Permeabilität  $\mu_{\text{Eff.}} = \frac{\mu_i}{1 + \mu_i \cdot l_{\text{Luft}} / l_{\text{Material}}}$ , die den Umstand des benötigten Luftspalts mitberücksichtigt und als Näherung für einen Luftspalt  $l_{\text{Luft}}$ , der viel kleiner als die effektive Magnetfeldlänge  $l_{\text{Material}}$  ist, angegeben werden kann. Aufgrund von  $\mu_{\text{Material}} \gg \mu_{\text{Luft}}$  kann hier das materialabhängige  $\mu_i$  als  $\mu_{\text{Material}}$  gesetzt werden. Mit diesen Vorüberlegungen kann ausgehend vom Durchflutungsgesetz und der allgemeinen Beziehung von magnetischer Feldstärke zur Flussdichte (2) angegeben werden –  $N$  ist die Windungszahl und  $\hat{I}_{\text{Max.}}$  der maximal auftretende Strom. Mit der Einführung der effektiven magnetischen Querschnittsfläche  $A_{\text{Eff.}}$  und der minimalen magnetischen Querschnittsfläche  $A_{\text{Min.}}$  ergibt sich (3) zur Grenzwertabschätzung der magnetischen Flussdichte.

$$B = \frac{N \hat{I}_{\text{Max.}}}{\frac{l_{\text{Material}}}{\mu_0 \mu_{\text{Material}}} + \frac{l_{\text{Luft}}}{\mu_0}} \quad (2)$$

$$B_{\text{Max.}} = \frac{N \hat{I}_{\text{max.}}}{\frac{l_{\text{Material}}}{\mu_0 \mu_{\text{Material}}} + \frac{l_{\text{Luft}}}{\mu_0}} \cdot \frac{A_{\text{Eff.}}}{A_{\text{Min.}}} \quad (3)$$

Diese Angaben sind mitunter nur für die älteren PM - Kerne (Ferrite) im Datenblatt ersichtlich, denn durch die verteilten Luftspalte und die Ringbandstruktur entfallen diese Beziehungen. Für diese Materialien kann jedoch der Induktivitätsfaktor  $A_L$  benutzt werden, der die mechanischen und magnetischen Eigenschaften in einem Wert zusammenfasst und von allen Herstellern angegeben wird. Letztendlich kann durch Einsetzen in (2) die Sättigungsflussdichte durch (4) in Abhängigkeit der Materialquerschnittsfläche  $A_{\text{Material}}$  angegeben werden.

$$B_{\text{Max.}} = \frac{N \hat{I}_{\text{Max.}} \cdot A_L}{A_{\text{Material}}} \quad (4)$$

Neben der Beachtung der Sättigungsflussdichte ist das Impedanzverhalten im Speziellen für EMV - Filter von besonderer Bedeutung. Mit dem Ziel einer größtmöglichen Emissionsdämpfung über einen breiten Frequenzbereich können die induktiven Bauelemente je nach Filterart in Gleich- und Gegentaktimpedanz aufgeteilt werden [10]. Im Allgemeinen ist die zu Beginn angesprochene Permeabilität, die großen Einfluss auf die Impedanz hat, für hohe Frequenzen komplex und beinhaltet alle Arten von möglichen Verlusten der Induktivitäten. Diese werden durch den imaginären Anteil mitberücksichtigt. Die komplexe Serienpermeabilität ist demzufolge definiert als  $\mu_{\text{Ser.}} = \mu'_{\text{Ser.}} - j\mu''_{\text{Ser.}} = \mu_0 (\mu'_{\text{RL}} - j\mu''_{\text{RR}})$  mit  $\mu'_{\text{RL}}$  als relative Permeabilität der Induktivität und  $\mu''_{\text{RR}}$  als relative Permeabilität des Widerstands. Die Impedanz errechnet sich demnach durch (5). Diese Terme können der Einfachheit halber in einen materialabhängigen Serienwiderstand, der sich proportional zur Frequenz sowie als eine Art Bandpass-Filter verhält und eine Serieninduktivität mit Tiefpassfilterverhalten zusammengefasst werden (Bild 6).

$$\underline{Z} = j\omega L = j\omega \underbrace{\frac{\mu_0 \mu'_{\text{RL}} A_{\text{Material}} N^2}{l_{\text{Material}}}}_{L_{\text{Ser.}}} + \omega \underbrace{\frac{\mu_0 \mu''_{\text{RR}} A_{\text{Material}} N^2}{l_{\text{Material}}}}_{R_{\text{Material}}} \quad (5)$$

Die Beschreibung der komplexen Permeabilität als materialabhängige Größe sowie die möglichen parasitären Eigenschaften (Bild 7) der Induktivität kennzeichnen ihr Impedanzverhalten [8, 9]. Dies wird an verschiedenen Kernmaterialien im nächsten Abschnitt demonstriert.

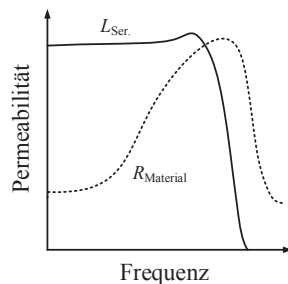


Bild 6: Komplexe Permeabilität über der Frequenz.

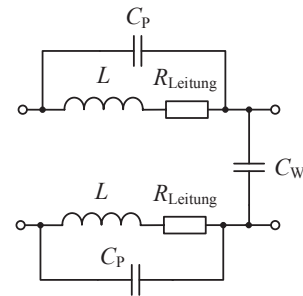


Bild 7: Ersatzschaltbild einer Gleich-takt-drossel.

## 5 Ausmessen ausgewählter Induktivitäten

Mit diesen Grundlagen wurde für einen Gleichspannungswandler in Interleaved - Struktur jeweils eine Speicherdrossel für 100 kHz und 300 kHz Schaltfrequenz und den in (1) definierten Spannungen sowie einem maximal auftretenden Strom von ca. 35 A ausgelegt. Die Induktivitätswerte wurden über dem Strom aufgetragen und sind in Bild 8 und 9 dargestellt. Deutlich sichtbar sind die Unterschiede im abfallenden Verhalten.

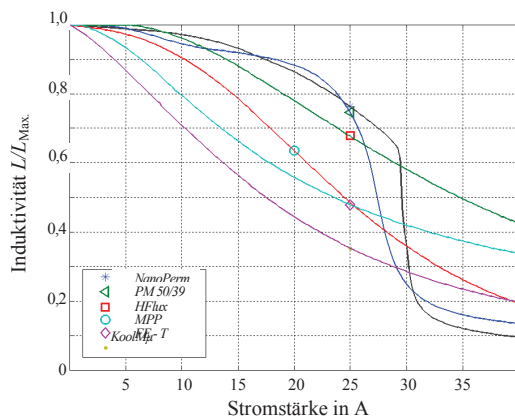


Bild 8: Kernmaterialien bei  $f = 100$  kHz.

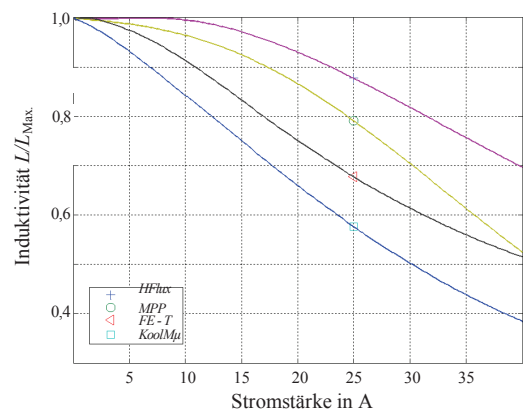


Bild 9: Kernmaterialien bei  $f = 300$  kHz.

Materialien mit sichtbarem Luftspalt (NanoPerm, PM) weisen ein konstanteres Verhalten am Anfang auf, fallen aber anschließend stark ab, sodass dort eine gewisse Reserve bei der Auslegung eingeplant werden sollte. Kerne mit einem verteilten Luftspalt zeichnen sich hingegen durch einen stetig abfallenden Verlauf aus. Der Leichteste ist hierbei der KoolM $\mu$  mit knapp 200 g. Der PM - Kern ist der Schwerste mit knapp 270 g (Referenzgewicht). Hieraus ergeben sich für 100 kHz Einsparungen aufgrund der Kernwahl von knapp 25 %. Bei 300 kHz wiegt der KoolM $\mu$  175 g, was eine Einsparung von knapp 35 % zum Referenzgewicht hervorruft. Eine weitere Erhöhung der Frequenz geht mit steigenden Anforderungen an das Kühlsystem und die Wahl der jeweiligen Halbleiter einher. Im Vergleich der Sättigungsflussdichte von  $B = 0,45$  T für 25 A für den PM - Kern ( $B_{Max.} = 0,5$  T)

bei 100 kHz und  $B = 1,06 \text{ T}$  bzw.  $B = 0,58 \text{ T}$  für die unterschiedlichen Frequenzen beim KoolM $\mu$ -Kern ( $B_{\text{Max.}} = 1,2 \text{ T}$ ) wird ersichtlich, dass dieser noch weit höhere Ströme führen kann und dadurch im Vergleich zu der Referenz weitere Gewichtsvorteile von ca. 30 % generiert. Mit dieser Messung wird deutlich, dass durch die Erhöhung der Taktfrequenz und durch die richtige Wahl des Kernmaterials Einsparungen von 65 % möglich sind. Jedoch sollte darauf geachtet werden, dass durch den geänderten Verlauf des Induktionsverhaltens die Sättigung anders beachtet werden muss. Hierbei haben sich für diese Art der Anwendung Werte von 60 % – 70 % der Nenninduktivität als ausreichend erwiesen. Neben der Beachtung der maximal auftretenden Flussdichte ist gerade für die Auslegung von EMV - Filtern das angesprochene Impedanzverhalten über der Frequenz von Bedeutung. Neue Materialien können hierbei einen Beitrag zur Gewichts- und Volumenreduzierung leisten. Wie bereits in Bild 2 gezeigt, sind diese Kernmaterialien jedoch stark frequenzabhängig und wirken sich somit entweder positiv oder negativ auf die geforderte möglichst hohe Impedanz aus. Ein Überblick dieser Thematik ist in Bild 10 dargestellt. Dort ist das Impedanzverhalten verschiedener Kernmaterialien über einer

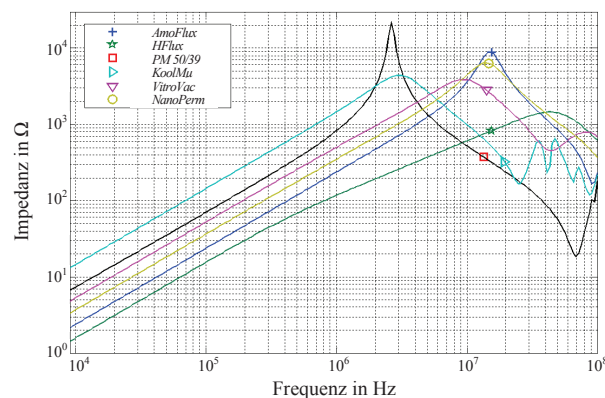


Bild 10: Übersicht des Impedanzverhaltens über der Frequenz für verschiedene Kernmaterialien.

Frequenz von 9 kHz – 100 MHz aufgetragen. Deutlich sichtbar sind die Unterschiede im Verhalten der einzelnen Kernvarianten, sodass nicht jedes Material – zumindest aus Sicht der EMV - Anwendung – als Filterkomponente genutzt werden kann. Als Referenzbeispiel für typische Filterkernmaterialien in diesem hier dargestellten Anwendungsfall sind die beiden Materialien VitroVac und NanoPerm genannt. Anhand derer Beispiele kann abgeschätzt werden, welche Charakteristik ein Material aufweisen müsste, sodass es für Filteranwendungen verwendet werden könnte. Das hierfür eingesetzte AmoFlux verhält sich dabei ähnlich wie die beiden Referenzmuster. Die anderen Varianten weichen von diesem Muster doch etwas stärker ab, sodass ein Einsatz als alleiniges Filterbauelement nicht empfohlen werden kann. Jedoch können diese Kerne als Unterstützung (Reihenschaltung) sowie zur Impedanzerhöhung verschiedener Frequenzbereiche durchaus Verwendung finden. Das angesprochene AmoFlux verhält sich von der Sättigungsflussdichte ähnlich wie die Kerne aus MPP - sowie KoolM $\mu$  - Materialien. Die Vorteile der Gewichtsminimierung bei gleichbleibendem Einsatzszenario kommen bei diesen Kernen besonders deutlich zum Tragen, denn das Gewicht des VitroVac beträgt 201 g, das des NanoPerm - Kerns 146 g und das Gewicht des AmoFlux beträgt nur rund 100 g. Hierdurch wird deutlich, dass sich durch die richtige Wahl des Kernmaterials für den spezifizierten Frequenzbereich circa 50 % Gewicht einsparen lassen.

## 6 Anwendungsbeispiel

Nachdem gezeigt wurde, dass sich durch neuere Kernmaterialien das Gewicht sowohl bei der Speicherdrossel als auch bei den verwendeten induktiven Bauelementen von EMV - Filtern einsparen lässt, soll dieser Sachverhalt an dem bereits angesprochenen Anwendungsfall demonstriert werden [10]. In Bild 11 und 12 sind die unterschiedlichen Gewichte eines 10 kW - DC/DC - Wandlers gegenübergestellt. Durch den Wechsel von PM 50/39 Kernen hin zu neueren HFlux - Materialien lassen sich circa 300 g oder aber 15 % Gewicht einsparen. Durch eine weitere Erhöhung der Taktfrequenz von 100 kHz auf 300 kHz bei

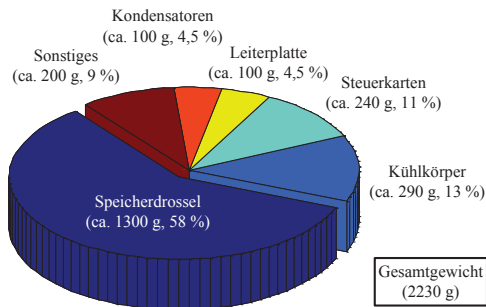


Bild 11: Gewichtsverteilung mit PM 50/39 Induktivitäten.

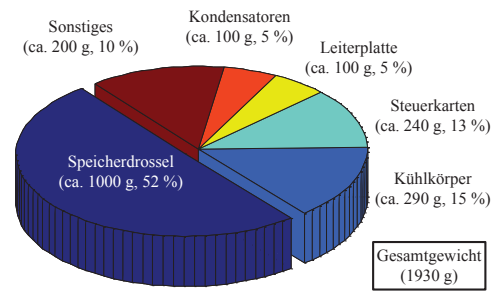


Bild 12: Gewichtsverteilung mit HFlux Induktivitäten.

gleichbleibenden äußeren Betriebsbedingungen lässt sich das Gewicht der HFlux - Kerne durch Reduzierung der Kerngeometrie sowie der Bewicklung um weitere 500 g oder aber 35 % reduzieren. Das Kühlkonzept muss dahingehend nicht erweitert werden, weil es im Vorhinein auf diese Frequenz ausgelegt wurde. In Bild 13 sowie 14 sind zwei 3D - Modelle von EMV - Filtern für diese Anwendung dargestellt. Anhand dieser Modelle werden ebenfalls Gewichtsabschätzungen durchgeführt und für die Ein- und Ausgangsseite mitberücksichtigt. Als Referenz dient hier ein herkömmliches Filter mit einem VitroVac - Kern. Dieser wurde im zweiten Filter durch einen AmoFlux - Kern ersetzt. Die Gewichte ergeben sich hier zu 381 g bzw. 270 g. Als Gesamtergebnis kann festgehalten werden, dass sich das Gewicht (Wandler + Ein- und Ausgangsfilter) von 2992 g auf 1970 g senken lässt und somit durch neue Kernmaterialien rund 35 % Gewicht eingespart werden kann. Die Leistungsdichte erhöht sich dadurch von 3,3 kW/kg auf 5,1 kW/kg.

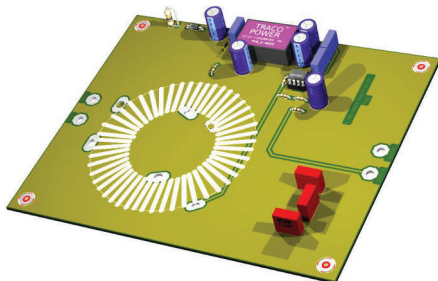


Bild 13: EMV - Filter mit VitroVac - Kerngeometrien.

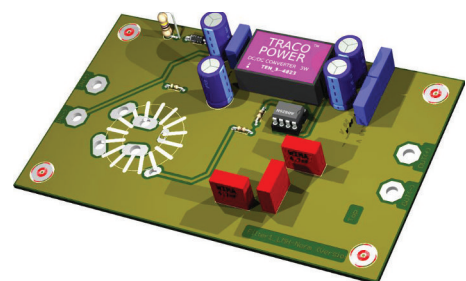


Bild 14: EMV - Filter mit AmoFlux - Kerngeometrien.

## 7 Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt die Gewichtseinsparungen bei der Verwendung von neuen Kernmaterialien für die Auslegung von Speicherdrosseln und EMV - Filtern für Gleichspannungswandler. Diese Minimierung ist gerade bei mobilen Anwendungsszenarien von Vorteil. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden verschiedene Materialien hinsichtlich ihrer Sättigungsflussdichte und ihres Impedanzverhaltens verglichen und dahingehend bewertet, welche Kernvarianten für welche Einsatzszenarien vielversprechend sind. Dies wurde an einem Anwendungsbeispiel in Form von Gewichtseinsparungen sowohl des Wandlers als auch der Filter demonstriert. Weiterhin kann dieser Ansatz dazu benutzt werden, über das Gebiet der DC/DC - Wandler hinaus Induktivitäten auszulegen und den Gewichtsvorteil neuartiger Materialien für mobile Systeme auszunutzen.

## Literatur

- [1] J.-R. K. Kuvedu-Libla, „Design Limitations of Powertrain Electronics – Automotive EMC Challenges“, Electromagnetic Compatibility, 2009. EMC 2009. IEEE International Symposium on, pp.121-126, 2009
- [2] A. McLoughlin, „More electric – Ready for take off?“, Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on, pp. 1-7, 2009
- [3] B. Chand, T. Kut und S. Dickmann, „Optimal Design of Active EMC Filters“, Adv. Radio Sci., Vol. 11, pp. 243 - 249, doi:10.5194/ars-11-243 - 2013, 2013
- [4] T. Kut, B. Chand, A. Lücken, S. Dickmann und D. Schulz, „EMC Studies on Systems with Hybrid Filter Circuits for Modern Aircraft Applications“, Adv. Radio Sci., Vol. 11, pp. 237 - 242, doi:10.5194/ars-11-237-2013, 2013
- [5] A. Roc'h und F. B. J. Leferink, „Analysis of Common Mode Inductors and Optimization Aspects“, Power Electronics and Power Systems. Electromagnetic Interference Issues. Bentham Science Publishers, Australien, pp. 3-37. ISBN 978-1-60805-240-0, 2012
- [6] U. Schlienz, „Schaltnetzteile und ihre Peripherie: Dimensionierung, Einsatz, EMV“, Vieweg Praxiswissen: Energietechnik, Vieweg + Teubner Verlag, ISBN 978-3-83480-239-2, 2007
- [7] Epcos AG, „Ferrites and Accessories: General Definitions“, Technische Dokumentation, 2006
- [8] M. K. Kazimierczuk, „High-Frequency Magnetic Components“, John Wiley & Sons, ISBN 978-1-11996-491-9, 2011
- [9] E. C. Snelling, „Soft ferrites: Properties and Applications“, 2nd ed., London Butterworths, 1988
- [10] T. Kut, A. Lücken, S. Dickmann und D. Schulz, „Design von Gleich- und Gegen-taktfiltern unter Berücksichtigung der Ein- und Ausgangsimpedanzen für Gleichspannungswandler im HVDC-Netz“, 61. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, urn:nbn:de:101:1-201211021656, Berlin, 2012